

DOI: 10.7667/PSPC170739

基于差分进化人工蜂群算法的光伏最大功率跟踪策略研究

盛四清, 陈玉良, 张晶晶

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 带有旁路二极管的光伏阵列在局部阴影时其 P-U 特性曲线会出现多个极值点, 此时常规 MPPT 方法在多峰值寻优时可能会失效。对光伏阵列输出特性功率极值点的个数进行了研究, 在此基础上将基于差分进化的人工蜂群算法应用于最大功率点跟踪。首先对蜜蜂的初始位置进行预定义初始化, 避免遗漏极值点。将差分进化算法中的变异策略与人工蜂群算法相结合, 实现时变条件下全局最大功率点跟踪控制。并且在上述算法中加入迭代终止策略, 从而有效避免系统稳态时的功率振荡现象。在 Matlab 中搭建 S-Function 仿真模型, 验证了该算法的有效性。
关键词: 光伏阵列; 最大功率点跟踪; 差分进化人工蜂群算法; 预定义初始化; S-Function 仿真模型

Research on maximum power point tracking strategy based on differential evolution artificial bee colony algorithm of photovoltaic system

SHENG Siqing, CHEN Yuliang, ZHANG Jingjing

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The P-U characteristics of the PV array with bypass diodes have multi local maximum power points under partially shadowed conditions, but Conventional Maximum Power Point Tracking (CMPPT) methods may fail to identify global maximum power points. The number of the extreme points in the output characteristics of PV array is studied, and the artificial bee colony algorithm based on differential evolution is applied to the MPPT. First, the initial positions of the bees are pre-defined to avoid missing the extreme points. Combining the mutation strategy in the differential evolution algorithm with the artificial bee colony algorithm to realize the global maximum power point tracking control under time-varying conditions, and efficient iteration stop strategy is proposed which could reduce the power oscillation when trending to steady state. The S-Function model is built in Matlab to verify the effectiveness of the algorithm.

Key words: PV array; maximum power point tracking; differential evolution artificial bee colony algorithm; predefined initialization; S-Function model

0 引言

在能源危机与环境污染日益严重的今天, 光伏发电以其清洁性、无限性被广泛应用于光伏发电机组以及并网系统。然而, 光伏阵列输出特性曲线具有非线性特性, 负载和环境条件对其输出功率有很大的影响, 并且光伏电池的光电转换效率较低, 因此最大功率跟踪控制(Maximum Power Point Tracking, MPPT)是提高光伏系统效率的一种有效措施^[1-2]。

带有旁路二极管的光伏阵列在局部阴影时其 P-U 特性曲线会出现多个极值点, 此时常规 MPPT 方法在多峰值寻优时可能会失效^[3-5]。对于大型光伏阵列来说, 其串并联光伏组件的个数越多, 光伏阵列输出特性的极值点数目也越多, 多峰值寻优的难

度也会随之增大^[6-8]。文献[9]通过改变光伏阵列联接形式, 发现改变光伏阵列连接结构能够增强其对阴影状况的免疫性能, 该方法的缺点是需要大量的电流、电压互感器, 不适用于大规模光伏阵列; 文献[10]通过对光伏阵列在不同遮阴模式下的输出特性进行研究, 发现光伏阵列功率极值点所在电压与开路电压之间的近似关系, 根据该规律缩小全局最大功率点搜索范围, 然后使用传统变步长算法跟踪全局最大功率点, 该方法的缺点是稳态时存在功率振荡现象; 文献[11]将人工蜂群算法应用于 MPPT, 该算法将蜂群位置随机初始化, 容易丢失功率极值点, 并且动态响应速度较慢; 文献[12]提出基于优化 PSO 算法的 MPPT 策略, 通过对粒子群算法相关参数的改进, 该算法能够准确搜索到全局最大功率点, 但该算法动态响应速度较慢, 并且存在一定的功率

损失。

针对上述问题，论文中提出了基于差分进化的人工蜂群算法，首先对光伏阵列输出特性功率极值点的个数进行了研究，通过对蜜蜂的初始位置进行预定义初始化，避免遗漏极值点，加快搜索速度，将差分进化算法中变异策略与人工蜂群算法相结合，实现时变条件下全局最大功率点跟踪控制，并且在上述算法中加入迭代终止策略，从而有效避免系统稳态时功率振荡现象。在 Matlab 搭建仿真模型，结果表明上述算法在静态和动态遮阴环境下均能快速搜索到全局最大功率点。

1 局部阴影时光伏阵列输出特性分析

光伏阵列被局部阴影遮挡时，由于旁路二极管的引入使得光伏阵列输出特性呈现出多峰特性，光伏阵列输出特性极值点对应的电压对于最大功率跟踪来说是一个重要信息。本文首先对局部阴影时光伏阵列输出特性局部极值点可能存在的个数进行了研究。

文献[13]根据阴影情况对光伏阵列串联支路进行分组，将遮挡情况相似的串联支路划分为一组，通过分析光伏阵列输出特性得出光伏阵列功率极值点个数最多为分组个数的结论。文献[12]以 $\{4 \times 3\}$ 光伏阵列为例，通过分析该光伏阵列在两种不同阴影模式下的输出特性，得出光伏阵列出现最多极值点的情况发生在每条支路光照强度各不相同，并且功率极值点的个数为 $n+1$ 的结论。本文通过对不同阵列在不同阴影条件下的输出特性进行大量仿真，提出对于 $\{m \times n\}$ 光伏阵列，其输出特性功率极值点的个数最多为 m 。以 $\{3 \times 4\}$ 光伏阵列为例，仿真中所用光伏电池参数为 $V_{oc} = 12.64 \text{ V}$ 、 $I_{sc} = 8.62 \text{ A}$ 、 $P_m = 83.28 \text{ W}$ 、 $V_m = 10.32 \text{ V}$ 、 $I_m = 8.07 \text{ A}$ ，以上参数均为标准测试条件下 ($T = 25^\circ \text{C}$ 、 $S = 1000 \text{ W/m}^2$) 数据。光伏阵列结构如图 1 所示。

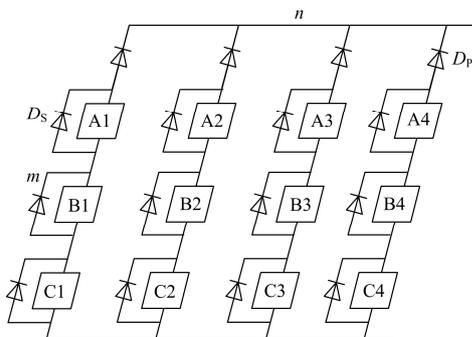


图 1 光伏阵列结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of photovoltaic array structure

根据阴影分布情况，对上述光伏阵列分为 4 组，阴影分布情况为 3:2:1:0。A1、B1、C1 的光照强度为 400 W/m^2 ；B2、C2 的光照强度为 400 W/m^2 ；C3 的光照强度为 300 W/m^2 ，其余未被遮挡部分的光照强度均为 1200 W/m^2 。该光伏阵列输出特性曲线如图 2 所示。光伏阵列开路电压 U_{oc_array} 为 37.40 V ，则光伏组件开路电压 U_{oc_module} 为 $U_{oc_array} / 3 = 12.64 \text{ V}$ 。

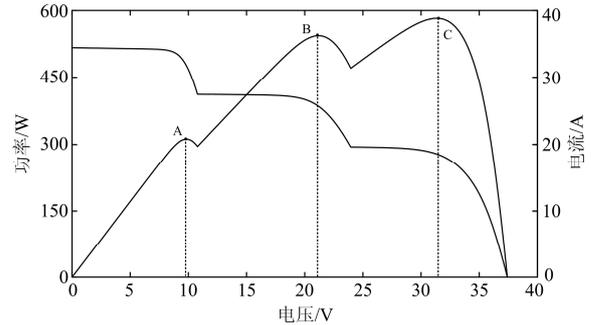


图 2 光伏阵列输出特性曲线

Fig. 2 PV array output characteristic curve

由图 2 分析可得，光伏阵列被分为 4 组，各个分组的遮阴情况互不相同，但其功率输出特性曲线存在 3 个功率极值点，分别为 A、B、C 三点，其中 C 点为全局最大功率点，并没有出现文献[11]中所说的 4 个极值点。其中， $U_A = 9.87 \text{ V} \approx 0.8 \times U_{oc_module}$ 、 $U_B = 21.18 \text{ V} \approx 2 \times 0.8 \times U_{oc_module}$ 、 $U_C = 31.33 \text{ V} \approx 3 \times 0.8 \times U_{oc_module}$ 。由以上分析可知，对于 $\{m \times n\}$ 光伏阵列，其输出特性功率极值点的个数最多为 m 。

2 差分进化人工蜂群算法

2.1 人工蜂群算法

人工蜂群算法(Artificial Bee Colony algorithm, ABC)是一种基于群体智能的启发式算法^[14-15]。在人工蜂群算法中，通过不同类型蜜蜂之间的信息交互以及角色转换来指导蜂群发现和采集蜂蜜，蜂群由三种类型的蜜蜂组成：侦查蜂、雇佣蜂以及跟随蜂。侦查蜂用来寻找新的蜜源；雇佣蜂是指已经被某个蜜源雇佣的蜜蜂，并且将该蜜源的有关信息通过特定的方式传递给跟随蜂，雇佣蜂的数目与食物源的数目相同；跟随蜂根据雇佣蜂传递回来的消息选择一个食物源。人工蜂群算法主要由以下几个步骤组成。

1) 初始化种群。在初始化阶段，ABC 算法产生

包含 N 个可行解的初始种群。每个可行解 $x_i (i=1,2,\dots,N)$ 用一个 D 维向量来表示, 即 $x_i = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^D)^T$ 。每个可行解通过式(1)产生。

$$x_{ij} = x_{\min,j} + \text{rand}[0,1](x_{\max,j} - x_{\min,j}) \quad (1)$$

式中: $i \in (1,2,\dots,N)$, $j \in (1,2,\dots,D)$; $x_{\max,j}$ 、 $x_{\min,j}$ 分别为可行解 x 取值的上界和下界。

2) 雇佣蜂搜索食物源, 计算其适应度, 通过贪婪法选择较好的食物源, 并将食物源的信息通过特定的方式传递给跟随蜂。

初始化之后, 蜂群会对所有蜜源进行循环搜索。在每一次的循环搜索中, 首先雇佣蜂随机选择蜜源, 并在各自选择蜜源的邻域内进行搜索以发现新的蜜源, 通过贪婪选择策略来选择适应度较高的蜜源。当所有雇佣蜂搜索完毕后, 将食物源的有关信息传递给跟随蜂。跟随蜂根据雇佣蜂提供的有关蜜源信息以一定的概率选择蜜源, 其中适应度越高的蜜源被选中的概率越大。同时跟随蜂也将进行一次邻域搜索, 选择适应度较大的蜜源进行开采。其中跟随蜂和雇佣蜂根据式(2)来进行搜索。

$$x'_{ij} = x_{ij} + \text{rand}[-1,1](x_{ij} - x_{kj}) \quad (2)$$

式中, $k \neq i$ 。

3) 若某个可行解经过有限次循环后其适应度依旧没有改善, 则该蜜源就会被放弃, 此时雇佣蜂转换为侦查蜂搜寻新的蜜源。

在 ABC 算法中, 当雇佣蜂被某蜜源雇佣时, 蜂蜜数量大的蜜源又会以较大的概率被跟随蜂选择, 这种正反馈机制能够加速算法的搜索过程, 提高算法的收敛速度; 同时, 当某个蜜源经过有限次搜索, 蜜源质量仍然得不到提高的将会被放弃, 这种负反馈机制能够避免该算法陷入局部极值的情况。

2.2 差分进化算法

差分进化算法(Differential Evolution, DE)与其他进化算法类似, 算法初始化后, 经过变异、交叉以及选择操作产生进化后的可行解, 并重复该过程, 直至满足算法终止迭代条件或者找到满足条件的最优解^[16-17]。详细介绍如下。

1) 初始化种群以及编码

差分进化算法初始化阶段与 ABC 算法初始化阶段类似, 初始可行解均可以通过式(1)得到。

2) 变异操作

初始化后, 利用父代种群个体之间的线性组合产生新个体的操作即为变异操作。具体做法为: 在种群中随机选择两个不同的个体, 得到差分向量

$D_{r_1 r_2} = x_{r_1} - x_{r_2}$, 然后该差分向量经过加权运算后与基向量相加产生新的个体 v 。DE 算法中有多种变异模式, 以下列写三种基本变异模式。

模式 1: DE/Rand/1

$$v_i = x_{r_1} + F \cdot (x_{r_2} - x_{r_3}) \quad (3)$$

模式 2: DE/Best/1

$$v_i = x_{\text{best}} + F \cdot (x_{r_1} - x_{r_2}) \quad (4)$$

模式 3: DE/Rand-to-Best/1

$$v_i = x_i + F \cdot (x_{\text{best}} - x_i) + F \cdot (x_{r_1} - x_{r_2}) \quad (5)$$

3) 交叉操作

DE 进化算法中为了增加种群多样性, 将变异向量 v_i 与目标向量 x_i 按照一定的规则进行离散交叉重组产生交叉向量 u_i , 用 C_r 表示交叉概率。本文中采用二项式交叉法, 具体方法为

$$u_{ij} = \begin{cases} v_{ij} & \text{rand}[0,1] \leq C_r \text{ or } j = j_{\text{rand}} \\ x_{ij} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

4) 选择操作

经过上述变异和交叉操作产生的交叉向量与目标向量的适应度进行比较, 选择适应度较高的个体保留到下一代。

2.3 差分进化人工蜂群算法

对于在解决复杂问题时人工蜂群算法存在收敛速度较慢、易于陷入局部最优解等问题, 本文将差分进化算法中变异策略与人工蜂群算法相结合, 对雇佣蜂的搜索模式进行改进, 提出差分进化人工蜂群算法(DE-ABC), 并将该算法应用于光伏阵列最大功率点跟踪。具体过程阐述如下。

1) 预定义初始化。

蜜蜂的位置代表光伏阵列电压值, 通过对蜜蜂位置进行预定义初始化, 将蜜蜂的位置置于峰值点附近, 可以避免遗漏极值点, 加快搜索速率。根据上文分析可知, 对于 $\{m \times n\}$ 阶光伏阵列, 其输出特性功率极值点的个数最多为 m 。因此按公式 $k \times 0.8 \times U_{\text{oc_module}}$ 对蜜蜂的位置进行初始化, 其中 k 为 $1 \sim m$ 的整数。

2) 雇佣蜂搜索食物源, 并计算其适应度。

对雇佣蜂的搜索模式进行改进, 将 DE/Rand-to-Best/1 模式应用于雇佣蜂搜索过程, 即

$$x'_{ij} = x_{ij} + F \cdot (x_{\text{best},j} - x_{ij}) + F \cdot (x_{r_1,j} - x_{r_2,j}) \quad (7)$$

式中, F 为缩放因子, 是影响算法收敛速度与种群多样性的重要参数之一。 F 取值越大, 有利于提高算法的搜索能力, 避免算法陷入局部最优, 但过大

的缩放因子会影响算法效率导致收敛速度降低； F 取值越小，有利于提高算法的开发能力，但会使算法陷入局部束缚。基于上述问题，本文采用缩放因子 F 先大后小的变化策略，当蜜蜂间的最大电压差值 $< 0.05 U_{oc_array}$ 时，对 F 取值进行调整。

- 3) 雇佣蜂选择适应度较高的蜜源。
- 4) 计算食物源 x_i 被跟随蜂选中的概率。

根据式(8)计算蜜源 x_i 被选中的概率 $P_c(i)$ ，该选择算子^[18-19]同时考虑了适应度概率以及个体浓度，这样使得适应度较高并且浓度较低的蜜源被选中的概率最大，从而在加快搜索速度的同时保证个体的多样性。

$$P_c(i) = \alpha P_f(i) + (1 - \alpha) P_d(i) \quad (8)$$

式中： P_f 为适应度概率，蜜源的适应度越大该值越大； P_d 为浓度概率，相似个体所占的比例越大该值越小。

5) 跟随蜂进行邻域搜索，计算其适应度，选择适应度较高的蜜源。

6) 判断是否存在被抛弃的食物源。

某个蜜源在经过 $limit$ 次搜索之后，其适应度依然没有改善，则该蜜源被放弃。此时按分散概率 P_{ed} 随机选取适应度低的个体并对其位置进行重新指定，避免算法陷入局部极值点。当蜂群之间的最大电压差 $< 0.5\% U_{oc_array}$ 时，认为找到最大功率点，终止迭代。所提算法流程图如图 3 所示。

3 仿真验证

将 DE-ABC 算法应该用于光伏阵列最大功率点跟踪，在 Matlab/Simulink 中搭建仿真模型，该模型以运行 DE-ABC 算法的 S-Function 模块为核心。系统仿真结构图如图 4 所示。

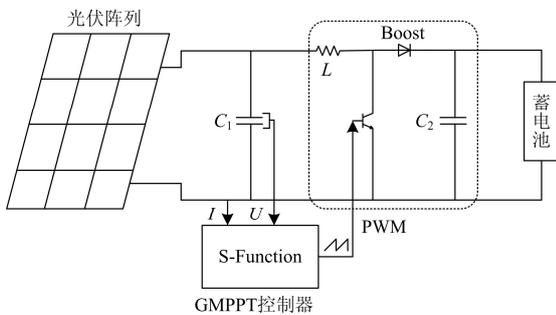


图 4 系统结构原理图

Fig. 4 Schematic diagram of the system structure

仿真以 $\{4 \times 3\}$ 光伏阵列为研究对象，光伏阵列参数如表 1 所示。仿真以图 5 所示的阴影情况为例。

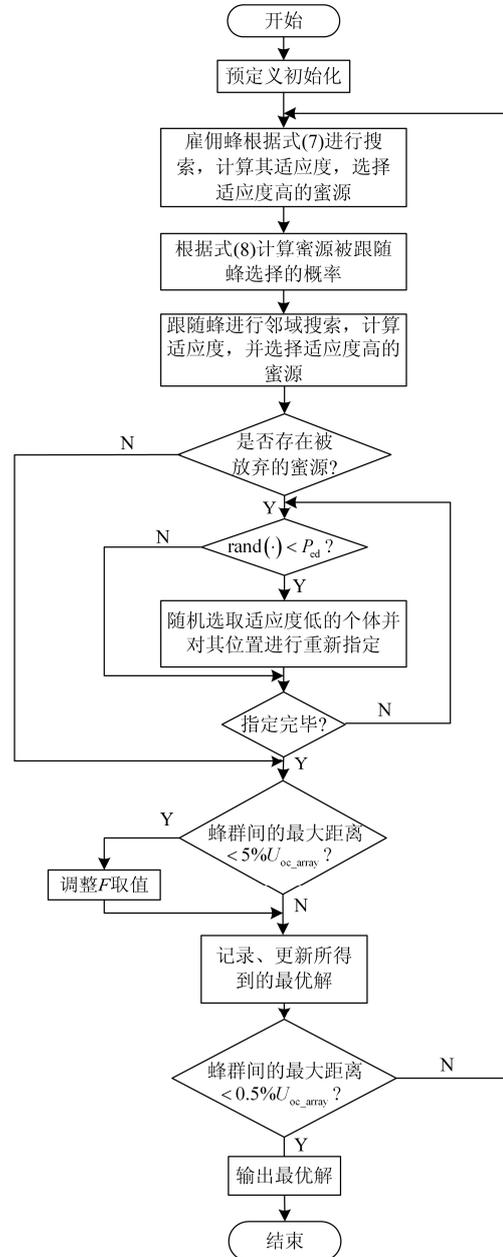


图 3 DE-ABC 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of DE-ABC algorithm

根据以上所述可知，该光伏阵列输出特性功率极值点的个数最多为 4，按公式 $k \times 0.8 \times U_{oc_module}$ 对蜜蜂的位置进行初始化，其中 k 为 1~4 的整数。蜂群位置初始化为 $[10.11 \text{ V} \ 20.22 \text{ V} \ 30.33 \text{ V} \ 40.45 \text{ V}]$ 。

表 1 光伏阵列参数表

Table 1 PV array parameter table

参数	数值	参数	数值
温度	25 °C	最大功率电压	42.32 V
光照强度	1 000 W/m ²	并联之路数目	3
开路电压	50.56 V	串联支路数目	4

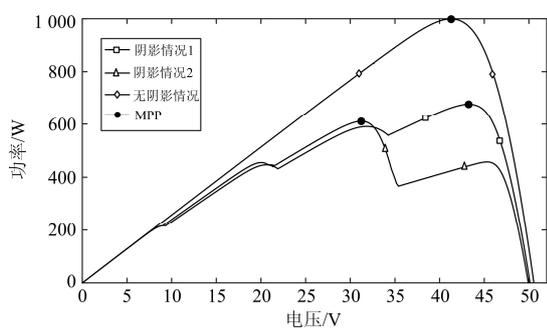


图 5 光伏阵列输出特性曲线

Fig. 5 Output characteristic curve of PV array

3.1 DE-ABC 算法在无遮阴情况中的应用

图 6 为 DE-ABC 算法在无遮阴情况下的功率及电压输出曲线。由图 5 可知, 在无遮阴情况下光伏阵列输出的实际最大功率为 999.39 W, 对应的电压为 42.31 V。由图 6 可以看出, 经过 0.92 s, 粒子间的最大电压差小于 $0.5\%U_{oc_array}$, 迭代终止, 此时得到的最大输出功率为 998.9 W, 相对误差为 0.05%, 仿真结果与实际输出功率相符, 证明所提算法在无遮阴情况下能够有效跟踪全局最大功率点, 并且在稳态时功率振荡较小。

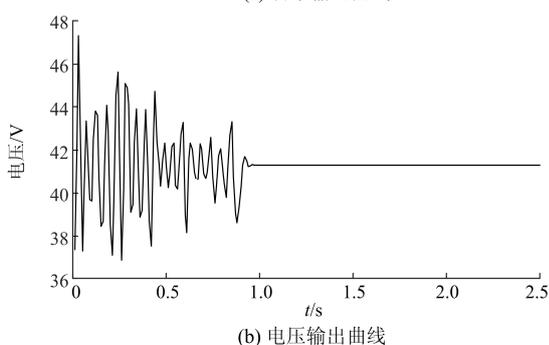
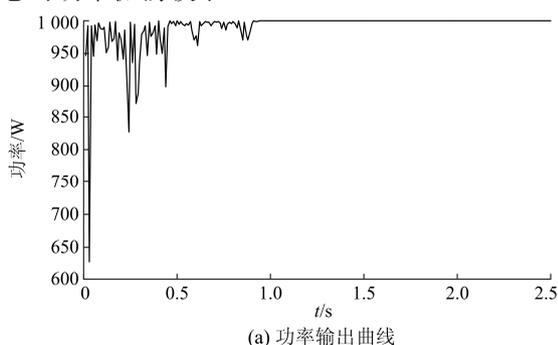


图 6 无遮阴情况时阵列功率及电压曲线

Fig. 6 Array power and voltage under uniform solar irradiance

3.2 DE-ABC 算法在静态遮阴情况中的应用

由图 5 可知, 遮阴情况 1 的 4 个功率极值点对应的电压分别为 9.09 V、20.59 V、31.79 V、43.28 V, 全局最大功率点为第 4 个极值点, 其对应

的最大功率为 676.02 W; 遮阴情况 2 的 4 个功率极值点所对应的电压分别为 8.73 V、20.03 V、31.27 V、45.31 V, 全局最大功率点为第 3 个极值点, 最大功率为 610.82 W。DE-ABC 算法在静态遮阴情况中的应用以阴影情况 1 为例, 其仿真结果如图 7 所示。从图 7 可以看出, 在 0.47 s 终止迭代条件得到满足, 停止扰动, 此时搜索到最大功率点功率为 675.6 W, 相对误差为 0.06%。证明该算法在静态阴影情况下能够快速、准确地跟踪全局最大功率点。

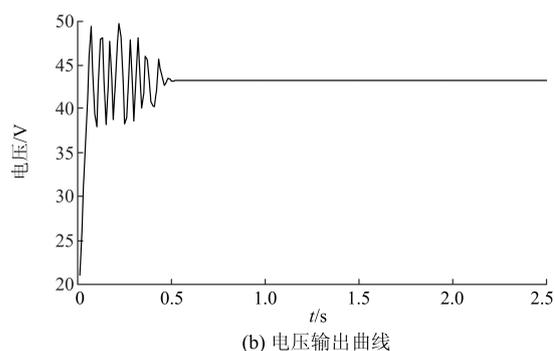
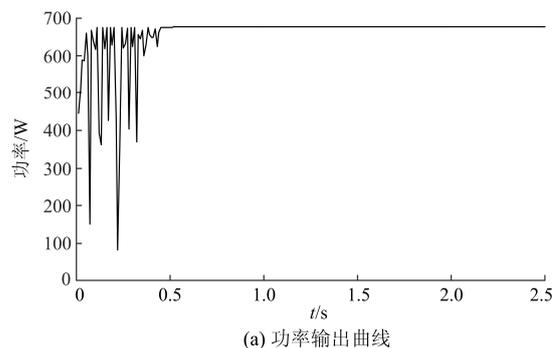


图 7 遮阴情况 1 阵列功率及电压曲线

Fig. 7 Array power and voltage under shading case 1

3.3 DE-ABC 算法在动态遮阴情况中的应用

DE-ABC 算法在动态遮阴情况下的仿真结果如图 8 所示。本次仿真中, 设置光伏阵列在 1.5 s 由阴影情况 1 变为阴影情况 2。由图 8 可以看出, 当遮

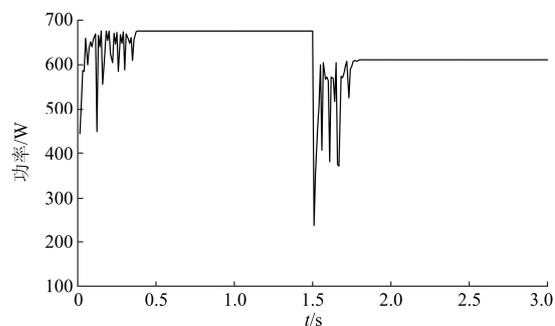


图 8 遮阴情况 2 阵列功率曲线

Fig. 8 Array power under shading case 2

阴模式发生改变时, DE-ABC 算法在 1.75 s 搜索到的最大功率为 610.8 W, 与实际最大功率 610.82 W 相差 0.02 W, 与实际最大功率相符, 表明所提算法在动态遮阴情况下也能够准确快速搜索到全局最大功率点。

3.4 常规 MPPT 算法在遮阴情况中的应用

图 9 为变步长电导增量法在遮阴模式 1 时的功率输出曲线。由图 9 可以看出, 该方法所跟踪到的最大功率为 590.7 W, 不是真正的全局最大功率点, 并且在稳态时伴随明显的功率振荡现象; 由图 7(a) 与图 9 对比可知, DE-ABC 算法具有全局搜索能力, 能够搜索到全局最大功率点, 并且能够有效解决稳态时的功率振荡现象。

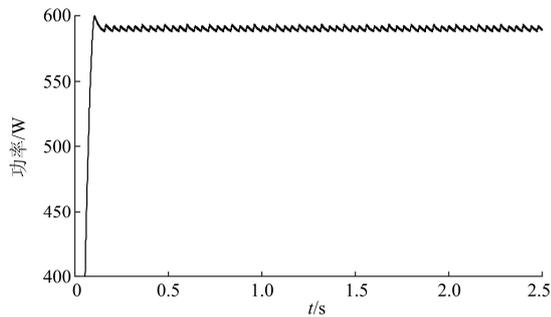


图 9 变步长电导增量法功率输出曲线

Fig. 9 Power output of variable step INC method

4 结论

通过对不同阵列在不同阴影情况下输出特性的仿真分析, 结果表明对于 $\{m \times n\}$ 光伏阵列来说, 其输出特性功率极值点的个数最多为 m 。在此基础上将基于差分进化的人工蜂群算法应用于 MPPT, 通过对蜜蜂初始位置预定于初始化, 能够有效避免遗漏极值点, 减少搜索时间。将 DE/Rand-to-Best/1 模式应用于雇佣蜂搜索过程, 对雇佣蜂的搜索模式进行改进, 并且对被放弃蜜源的蜜蜂位置进行重新指定, 有效避免跟踪过程陷入局部最大功率点。在 Matlab 搭建 S-Function 仿真模型, 仿真结果表明 DE-ABC 算法在静态、动态遮阴情况下均能快速找到全局最大功率点, 并且有效避免系统稳态时的功率振荡现象, 具有实际意义。

参考文献

[1] 聂晓华, 赖家俊. 局部阴影下光伏阵列全局最大功率点跟踪控制方法综述[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3279-3285.
NIE Xiaohua, LAI Jiajun. A survey on tracking and control approaches for global maximum power point of

photovoltaic arrays in partially shaded environment[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3279-3285.
[2] ELTAWIL M A, ZHAO Z. MPPT techniques for photovoltaic applications[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2013, 25(3): 793-813.
[3] JAVED M Y, MURTAZA A F, LING Q, et al. A novel MPPT design using generalized pattern search for partial shading[J]. Energy & Buildings, 2016, 133: 59-69.
[4] DABRA V, PALIWAL K K, SHARMA P, et al. Optimization of photovoltaic power system: a comparative study[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 29-39. DOI: 10.1186/s41601-017-0036-2.
[5] 原敬磊, 张建成. 一种改进的变步长电导增量光伏电源 MPPT 控制方法[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(1): 75-79.
YUAN Jinglei, ZHANG Jiancheng. An improved variational step incremental conductance control method for maximum power point tracking in photovoltaic system[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(1): 75-79.
[6] 孙航, 杜海江, 季迎旭, 等. 光伏分布式 MPPT 机理分析与仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 48-54.
SUN Hang, DU Haijiang, JI Yingxu, et al. Photovoltaic distributed MPPT mechanism analysis and simulation study[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 48-54.
[7] 姬伟超, 殷时蓉, 刘朝涛. 基于 Buck-Boost 拓扑的新量子遗传算法在 MPPT 技术中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 92-96.
JI Weichao, YIN Shirong, LIU Chaotao. Maximum power point tracking based on Buck-Boost topology with new quantum genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 92-96.
[8] 项丽, 王冰, 李笑宇, 等. 光伏系统多峰值 MPPT 控制方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(8): 68-72.
XIANG Li, WANG Bing, LI Xiaoyu, et al. Multi-peak maximum power point track control method of photovoltaic system[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(8): 68-72.
[9] VILLA L F L, PICAULT D, RAISON B, et al. Maximizing the power output of partially shaded photovoltaic plants through optimization of the interconnections among its

- modules[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2012, 2(2): 154-163.
- [10] 孙博, 梅军, 郑建勇. 局部阴影条件下最大功率点跟踪改进算法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(1): 115-119. SUN Bo, MEI Jun, ZHENG Jianyong. Improved MPPT method under partial shading conditions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 115-119.
- [11] BENOUCHEF A S, CHOUDER A, KARA K, et al. Artificial bee colony based algorithm for maximum power point tracking (MPPT) for PV systems operating under partial shaded conditions[J]. Applied Soft Computing, 2015, 32: 38-48.
- [12] 朱艳伟, 石新春, 但扬清, 等. 粒子群优化算法在光伏阵列多峰最大功率点跟踪中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 42-48. ZHU Yanwei, SHI Xinchun, DAN Yangqing, et al. Application of PSO algorithm in global MPPT for PV array[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 42-48.
- [13] ISHAQUE K, SALAM Z, TAHERI H, et al. Maximum power point tracking for PV system under partial shading condition via particle swarm optimization[C] // Applied Power Electronics Colloquium, April 18-19, 2011, Johor Bahru, Malaysia: 5-9.
- [14] 秦全德, 程适, 李丽, 等. 人工蜂群算法研究综述[J]. 智能系统学报, 2014, 9(2): 127-135. QIN Quande, CHENG Shi, LI Li, et al. Artificial bee colony algorithm: a survey[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2014, 9(2): 127-135.
- [15] 李星硕, 文辉清. 基于 β 参数的变步长MPPT控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 58-63. LI Xingshuo, WEN Huiqing. Research on an improved β -based variable step MPPT algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 58-63.
- [16] 简献忠, 严军, 范建鹏, 等. 基于差分进化算法的光伏阵列 MPPT 控制方法[J]. 控制工程, 2014, 21(4): 559-562. JIAN Xianzhong, YAN Jun, FAN Jianpeng, et al. MPPT control method of photovoltaic array based on differential evolution algorithm[J]. Control Engineering, 2014, 21(4): 559-562.
- [17] TAJUDDIN M F N, AYOB S M, SALAM Z, et al. Evolutionary based maximum power point tracking technique using differential evolution algorithm[J]. Energy & Buildings, 2013, 67(6): 245-252.
- [18] 张明锐, 蒋利明, 孙华, 等. 基于免疫细菌觅食算法的大容量光伏阵列 GMPPT 算法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 104-111. ZHANG Mingrui, JIANG Liming, SUN Hua, et al. Large-capacity photovoltaic array's GMPPT technology based on the immune bacterial foraging optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 104-111.
- [19] 姜建国, 周佳薇, 郑迎春, 等. 一种双菌群细菌觅食优化算法[J]. 深圳大学学报(理工版), 2014, 31(1): 43-51. JIANG Jianguo, ZHOU Jiawei, ZHENG Yingchun, et al. A double flora bacteria foraging optimization algorithm[J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2014, 31(1): 43-51.

收稿日期: 2017-05-17; 修回日期: 2017-08-12

作者简介:

盛四清(1965—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: hdbdssq@163.com

陈玉良(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制。E-mail: chen_yl3@163.com

(编辑 魏小丽)